

画素内高密度容量搭載による高飽和CMOSイメージセンサの高性能化に関する研究

著者	村田 真麻
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	89
号	1
ページ	254-255
発行年	2020-08-31
URL	http://hdl.handle.net/10097/00129094

修士学位論文要約（令和2年3月）

画素内高密度容量搭載による
高飽和 CMOS イメージセンサの高性能化に関する研究

村田 真麻

指導教員：須川 成利， 研究指導教員：黒田 理人

A Study on Improvement of High Saturation CMOS Image Sensor
Introducing High Spatial Efficiency Capacitor in Each Pixel

Maasa MURATA

Supervisor: Shigetoshi SUGAWA, Research Advisor: Rihito KURODA

This thesis presents a 16 μm pitch CMOS image sensor exhibiting high near infrared (NIR) sensitivity and 71.3dB signal-to-noise ratio with linear response for high precision absorption imaging. A 1.6pF lateral overflow integration trench capacitor was introduced as a high spatial efficiency capacitor in each pixel to achieve very high full well capacity. Both spatial resolution and light sensitivity toward NIR light were further improved due to thinning the Si substrate and applying a negative backside bias. As one of applications of the developed CMOS image sensor, NIR absorption images toward non-invasive blood glucose measurement has been successfully captured and diffusion of 5mg/dl glucose was clearly visualized at 1050nm in real time.

1. はじめに

IoT の普及に伴い、CMOS イメージセンサ(CIS)を用いたセンシング技術は、ヘルスケア、医療、食品検査、農業、災害予測、車載等のさまざまな分野における基盤技術として期待されている。吸光分析や干渉断層撮影等の光情報を用いる高精度センシング技術には、高照度下における微小な光信号変化の計測が必要とされ¹⁻³⁾、信号対雑音比(SNR)が重要な測定精度指標となり、CIS の各画素で吸光分析を行う吸光イメージングには、70dB 以上の高 SNR 性能が求められる¹⁻²⁾。高照度下では、フォトンショットノイズが全体ノイズを律則するため、1000 万電子超の飽和電子数(FWC)が必要となる。加えて、紫外光から近赤外光までの広光波長帯域の中から適切な波長を選択することで、様々な応用に適用可能となる⁴⁾。

これまでの研究では、フォトダイオード(PD)・フローティングディフュージョン(FD)容量部と、飽和性能を独立に最適化できる特長を活かし、1pF の横型オーバーフロー蓄積容量(LOFIC)を低不純物濃度 p 型 Si 基板上の各画素に配備することで、1500 万個の飽和電子数と近赤外光に対する高い PD 量子効率を達成した CIS を開発されていた。一方で、LOFIC の形成には容量密度が限定的な平面 MOS 容量と MIM 容量を用いており、開口率が 10%程度と低いことが課題となっていた。

本研究では、1.6pF のトレンチ型容量を LOFIC として適応して実効的な容量密度を高める、高開口率と高飽和性能を達成した CIS を新たに開発した。

2. 画素内高密度容量を有する高飽和 CMOS イメージセンサの設計・試作・測定

これまでに、容量密度約 30fF/ μm^2 の高密度トレンチ容量を画素アレイ近傍に搭載し、アナログメモリとして使用するバースト撮像型グローバルシャッタ CIS が報告されている⁵⁾。このトレンチ型 MOS 容量は、実効電極面積の拡大により平面 MOS 容量の約 5 倍の容量密度を達成している。本研究ではこのトレンチ容量を低不純物濃度基板の画素内に高密度に集積した。PD 部とトレンチキャパシタ間に生じるポテンシャル障壁が基板濃度の低下に伴って下がることでトレンチ容量から PD 部へとパンチスルーが発生し、光電荷を正しく検出できなくなることがプロセス・デバイスシミュレーションにて確認できた。そこで、トレンチ容量の全面を覆う深い p 型の注入を行うことで、開口率を損なわずにパンチスルーを抑制する構造を導入した。p 型注入の濃度はトレンチ容量の信号電圧範囲(0.5-3.0V)において、一定容量が得られるように最適化した。

図 1 に開発したセンサのチップ写真と画素レイアウトを示す⁶⁾。約 1.6pF と大きな LOFIC と画素ソースフォロワの閾値ばらつきを抑制する Dual VR 機構³⁾を搭載している。図 2 に光電変換特性を示す。高感度 S1 信号と高飽和 S2 信号における線形性と 130dB のダイナミックレンジを達成した。図 3 に Dual VR 動作モードにおける FWC と SNR 特性を示す。高照度下において線形応答と 24.3Mc の FWC を達成し、信号範囲内において常に 70dB 超の SNR が得られていることを確認した。図 4 にセンサの分光感度特性を示す。紫外光に高感

度・高光耐性な PD 技術⁸⁾と近赤外光感度を高める低不純物濃度 p 型 Si 基板により、200-1100nm における高量子効率を達成した。開口率を先行研究比 5 倍とすることで、高飽和と高感度を両立した。

3. 非侵襲血糖値測定に向けた原理確認実験

近年、生活習慣の変化に伴い、糖尿病患者の数が急増しており、非侵襲かつリアルタイムな血糖値測定器が求められている。開発した CIS を用いた応用実験として、近赤外吸光によるグルコース濃度イメージングを行った。Si の感度帯域内におけるグルコースの吸光ピーク波長の 1 つとして 1050nm の LED とバンドパスフィルタを用い、生理食塩水を入れた光路長 10mm のセル中に 5mg/dl のグルコース溶液を滴下し、拡散・対流する様子をリアルタイムかつ明瞭に捉えることが出来た。図 5 に取得した画像を示す。

4. まとめ

低不純物濃度 p 型 Si 基板の画素内に高密度トレンチ容量を搭載した、広光波長帯域・高飽和・高感度 CIS の設計、試作しその特性を測定し、71.3dB の SNR、光に対する線形応答、24.3Me⁻の飽和電子数と近赤外光に対する高量子効率を達成した。非侵襲血糖値計測センサの応用に向けた基礎実験として、5mg/dl のグルコース溶液が拡散する様子をリアルタイムに捉え、提案技術の有用性を示した。本研究技術は、医療・農業・環境・車載など、様々な分野における高精度センシングデバイスとして、IoT 社会のさらなる発展に寄与できると考えられる。

文献

- 1) G. Meynants, et al., IISW, pp.409-412, 2015.

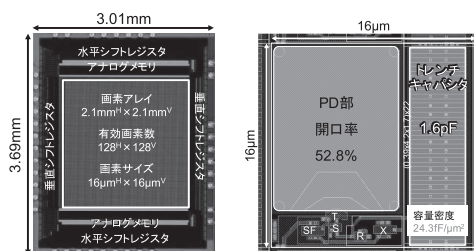


図1 開発した CMOS イメージセンサ。

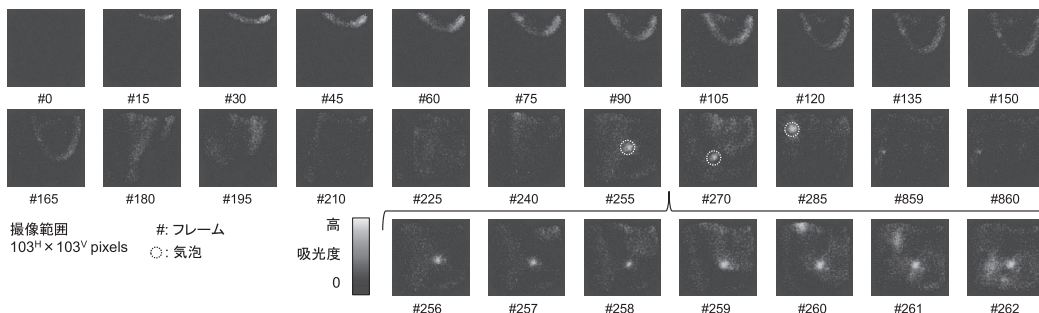


図5 グルコース近赤外吸光イメージング結果。

- 2) Y. Fujihara, et al., Trans. MTA, pp.187-194, 2018.
- 3) Y. Aoyagi, et al., JJAP, SBBL03-1-6, 2018.
- 4) S. Sugawa, et al., ISSCC, pp. 352-353, 603, 2005.
- 5) M. Suzuki, et al., IEDM, pp.212-215, 2016.
- 6) M. Murata, et al., IEDM, pp.225-228, 2018.
- 7) M. Murata, et al., to be published in IEEE T-ED, 2020, April.
- 8) R. Kuroda, et al., Trans. MTA, pp.123-130, 2014.

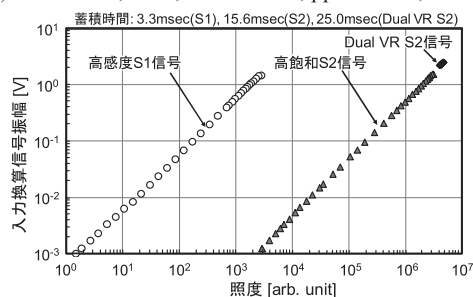


図2 光電変換特性。

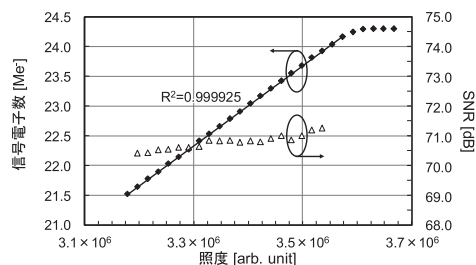


図3 SNR 特性。

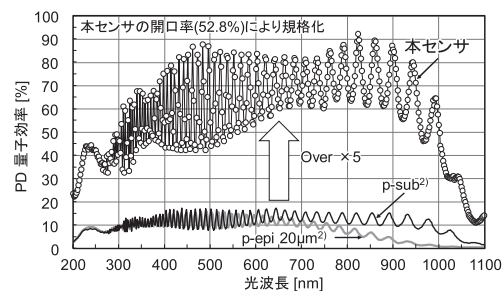


図4 分光感度特性。